

Міністерство освіти і науки України  
Львівський національний університет імені Івана Франка  
Факультет прикладної математики та інформатики  
Кафедра обчислювальної математики

## З В І Т

з проєкту на тему  
«Агентне моделювання»

Студенти групи ПМП-41:  
**Куцик Владислав Петрович**  
**Горбачук Богдана Андріївна**  
**Монастирська Владислава Віталіївна**  
**Сенів Софія Андріївна**  
Спеціальність 113 — прикладна математика

Викладачі:  
доц. Кухарський В.М.  
доц. Ящук Ю.О.  
ас. Телюк М.Б.

Львів — 2025

# Зміст

<b>Вступ</b>	<b>3</b>
<b>1 Агентне моделювання</b>	<b>4</b>
1.1 Постановка задачі . . . . .	4
1.2 Середовище розробки . . . . .	4
<b>2 Моделювання</b>	<b>5</b>
2.1 Вибір перехрестя . . . . .	5
2.2 Моделювання початкового перехрестя . . . . .	6
2.3 Метрики . . . . .	8
<b>3 Оптимізація</b>	<b>11</b>
3.1 Перша оптимізована модель . . . . .	11
3.2 Покращена модель . . . . .	15
3.3 Найкраще оптимізована модель . . . . .	18
<b>Висновки</b>	<b>23</b>
<b>Література</b>	<b>24</b>
<b>Додаток</b>	<b>24</b>

## Вступ

Симуляція руху транспорту – це важлива тема в математичному моделюванні. У цій галузі вони дозволяють нам вивчати рух транспорту на дорогах, залізницях, морях і повітряному транспорті. Їх використання дозволяє аналізувати різні аспекти руху транспорту, такі як швидкість, пропускну здатність, потребу в ресурсах, трафік, відстані між транспортними засобами тощо.

У даній роботі розглянуто симуляцію руху транспорту, проаналізовано та описано математичну модель, що використовується для симуляції руху транспорту.

# 1 Агентне моделювання

## 1.1 Постановка задачі

Зібрати дані про рух транспорту на перехресті. Змоделювати у середовищі. Дослідити можливість оптимізації руху транспорту при наявному навантаженні та/або у випадку значного збільшення навантаження. Перехрестя повинно мати сумарно не менше 5 смуг руху. Вихідна та/або оптимізована модель повинна включати світлофор. Представити можливість чи неможливість оптимізації руху в якості результатів.

## 1.2 Середовище розробки

Eclipse SUMO (Simulation of Urban MObility) – це безкоштовне програмне забезпечення для моделювання транспортних потоків у міських середовищах. Воно може використовуватися для дослідження різних аспектів міської транспортної інфраструктури, таких як потоки транспорту, розподіл руху, вплив різних видів транспорту на навколишнє середовище, організацію дорожнього руху тощо.

SUMO дозволяє користувачам моделювати рух транспорту в різних контекстах, включаючи міста, мікрорайони та автомагістралі. Це забезпечує можливість вивчення взаємодії між транспортом та іншими елементами міської інфраструктури, такими як світлофори, зупинки громадського транспорту, перехрестя тощо.

Застосування SUMO можна знайти в багатьох сферах, таких як дослідження транспортного руху, проектування доріг і транспортних систем, вивчення впливу різних факторів на трафік тощо. SUMO також може бути використано для тестування транспортних систем та стратегій управління рухом транспорту, що може допомогти зменшити негативний вплив транспорту на довкілля та покращити якість життя людей.

## 2 Моделювання

### 2.1 Вибір перехрестя

У постановці задачі було запропоновано обрати одне з львівських перехресть, яке повинне відповідати вищезазначеним вимогам. Ретельно дослідивши значну кількість перехресть та доріг, було вирішено обрати для моделювання перехрестя вулиць Липинського та Замарстинівської, зображене на Рис. 1.

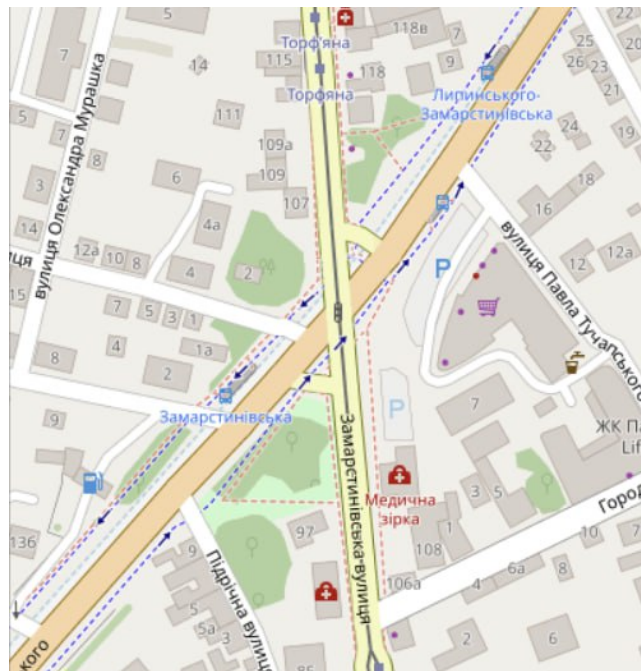


Рис. 1: Схема перехрестя для подальшої оптимізації

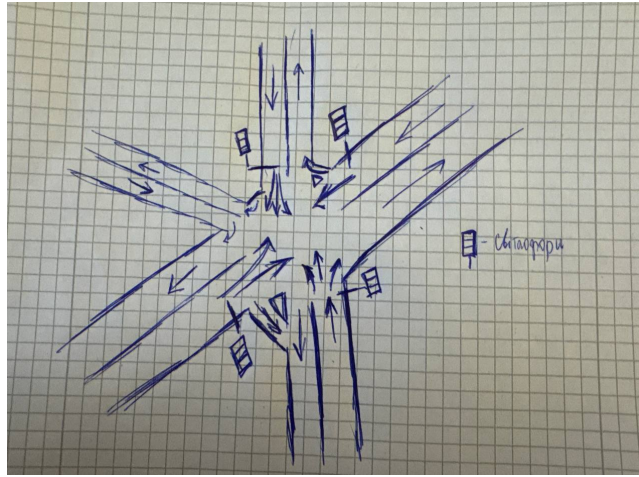


Рис. 2: Напрямок руху на перехресті та суміжних вулицях

Оскільки перехрестя між вулицями формує великий спарений простір, а також автомобілі з вулиць здійснюють повороти як вліво, так і вправо, то ризик виникнення заторів значно зростає, а світлофори покращують ситуацію при нормальному навантаженні, проте погіршують при надмірному. Частково, автомобілі, що повертають наліво, не мають змоги здійснити свій поворот при зеленому світлі світлофора, що змушує їх чекати до зміни на червоний. Окрім того дуже довге перехрестя створює ризики того, що вулиця, на якій вже наявний затор, може перегородити рух на іншій, та спровокувати затор і там.

## 2.2 Моделювання початкового перехрестя

Для моделювання обрано дві ключові вулиці - Замарстинівська та Липинського, які формують перехрестя, а також бічну вулицю Покутську, яка знаходить відразу при виїзді з перехрестя та підвищує ризик заторів. Інші бічні вулиці відкинуто з розгляду, адже вони мало впливають на рух або знаходяться достатньо далеко порівняно з ключовою точкою перехрестя.

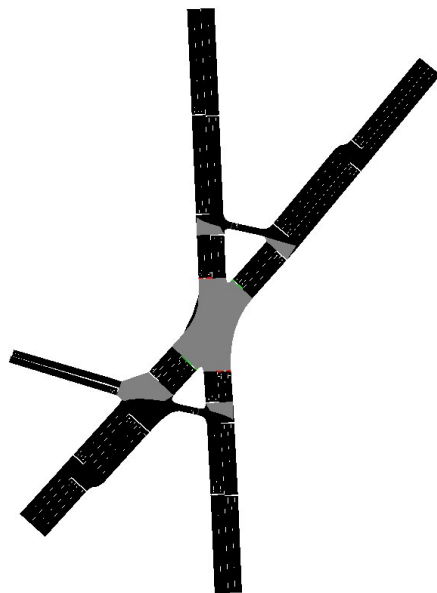


Рис. 3: Змодельоване перехрестя в середовищі SUMO

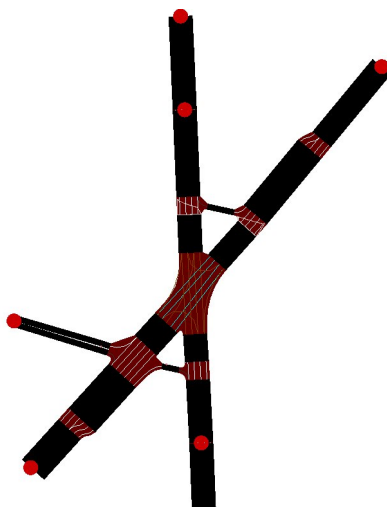


Рис. 4: Рух по смугах

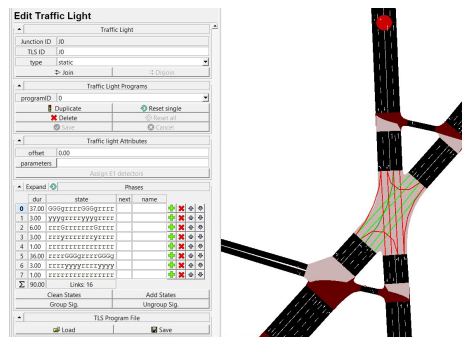


Рис. 5: Регулювання руху початкового перехрестя світлофором

Так як мета виконання роботи - оптимізувати перехрестя, варто проаналізувати його з теоретичної точки зору, переходячи до практичних показників. Основна мета оптимізації - замінити центральне перехрестя на таку формацію, що дозволить транспортним засобам приблизно рівномірно рухатись у всі напрямки (особливо здійснювати поворот наліво), зменшити ризики заторів на перетині доріг та залежність доріг одна від одної. Окрім того зробити перехрестя більш стабільним та прогнозованим.

## 2.3 Метрики

Виконано імітацію руху транспорту по реальному перехрестю та отримано початкові дані, завдяки чому визначили метрики для оптимізації. Початкові дані - нестабільні, зокрема швидкість, тому потрібно збільшити пропускну спроможність перехрестя, покращити і стабілізувати показники, щоб воно стало більш прогнозованим. А також оптимізувати часові показники.

За метрики для орієнтування обрано: speed - швидкість транспортного засобу (збільшити), duration - тривалість поїздки (необхідно зменшити), waitingTime - час очікування або простою (необхідно зменшити), timeLoss - втрачений час через затримки (необхідно зменшити).

Для графічної інтерпретації даних обрано наступні графіки: halting - зупинені транспортні засоби (необхідно зменшити), running vehicles - транспортні засоби в русі (необхідно стабілізувати та зменшити), average speed - середня швидкість транспортних засобів у мережі на певний момент (необхідно стабілізувати та збільшити). Окрім того, відразу можна помітити аналогічну до реальної ситуації проблему - скупчення ТЗ на світлофорах.



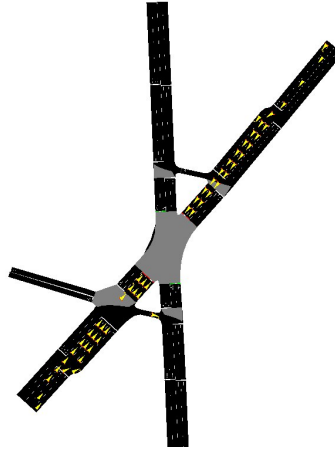


Рис. 6: Місце найбільшого скупчення транспорту

```
Simulation ended at time: 6507.00.
Reason: All vehicles have left the simulation.
Performance:
Duration: 5.95s
Real time factor: 1093.25
UPS: 49130.712366
Vehicles:
Inserted: 4541
Running: 0
Waiting: 0
Teleports: 1 (Collisions: 1)
Statistics (avg of 4541):
Routelength: 265.70
Speed: 5.88
Duration: 64.40
WaitingTime: 31.49
TimeLoss: 44.50
DepartDelay: 979.18
DijkstraRouter answered 7650 queries and explored 10.20 edges on average.
DijkstraRouter spent 0.02s answering queries (0.00ms on average).
```

Рис. 7: Консольні дані моделі

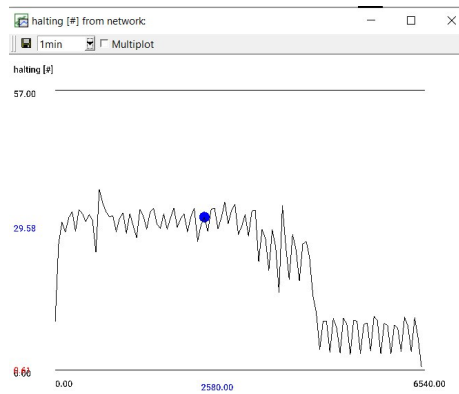


Рис. 8: Транспортні засоби, які зупинилися

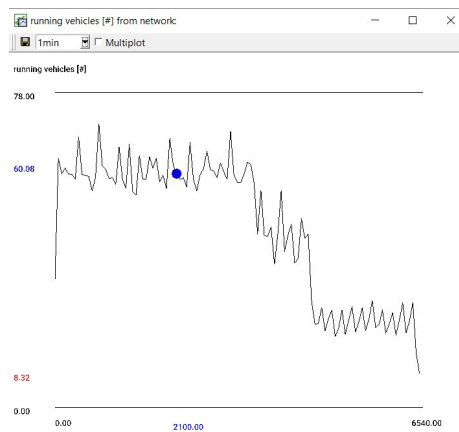


Рис. 9: Транспортні засоби в русі

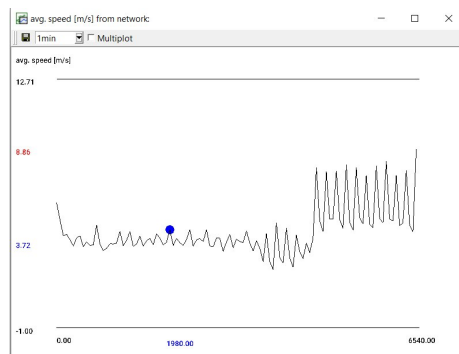


Рис. 10: Середня швидкість ТЗ

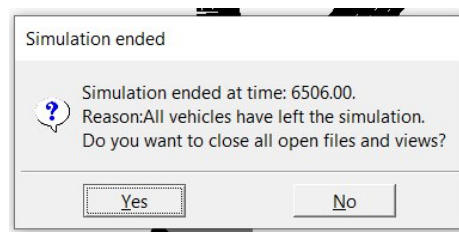


Рис. 11: Час симуляції

## 3 Оптимізація

### 3.1 Перша оптимізована модель

Першою ідеєю для оптимізації перехрестя виступає перетворення його в псевдокільце з регулюванням руху по ключових перетинах доріг за допомогою чотирьох світлофорів. Таким чином, більшість ТЗ змушені проїжджати від одного до двох світлофорів, проте ключовою причиною такої складності виступала ідея зменшити кількість ТЗ, які водночас перебувають на одному перехресті, і цим зменшують потенційні затори або конфлікти доріг. Світлофори в моделі були налаштовані таким чином, щоб дозволити одночасний проїзд автомобілів вулицею Липинського обидвох перехресть, що йдуть підряд, і таким чином зменшити потенційні пробки на більш завантаженій вулиці.

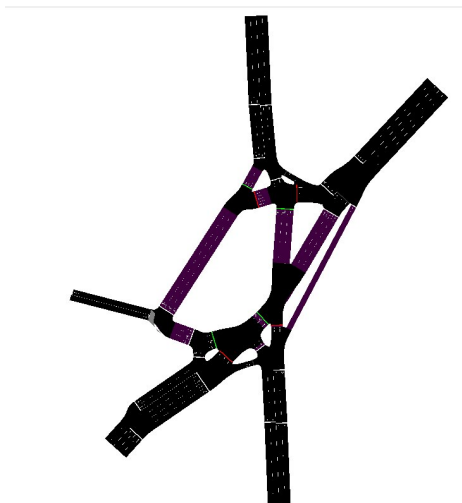


Рис. 12: Перший варіант зміненої моделі в SUMO

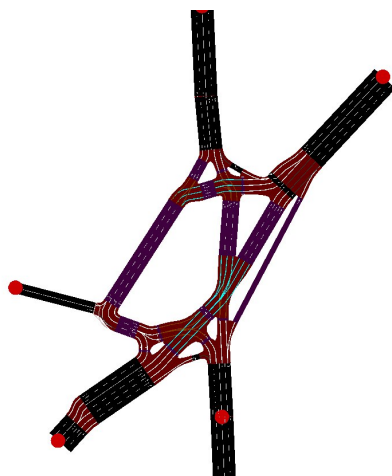


Рис. 13: Рух по смугах

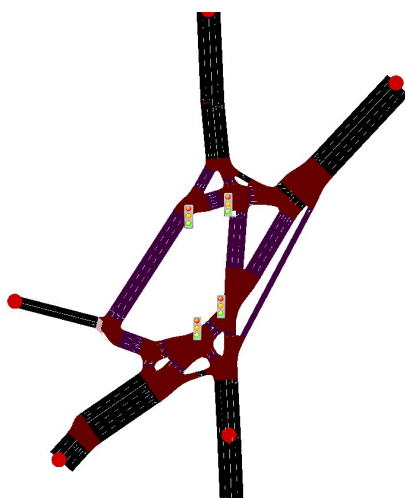


Рис. 14: Регулювання світлофорами

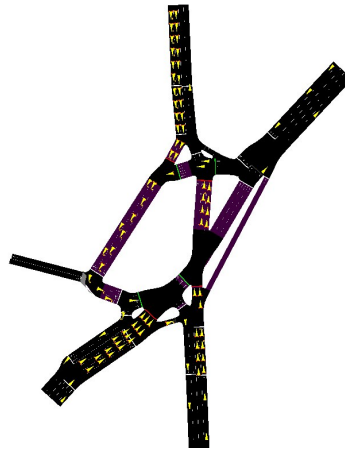


Рис. 15: Найпроблемніші ділянки перехрестя

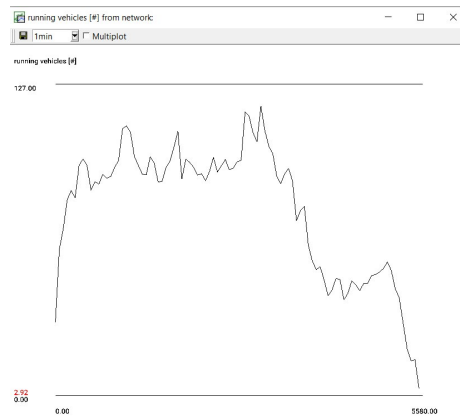


Рис. 16: ТЗ в русі

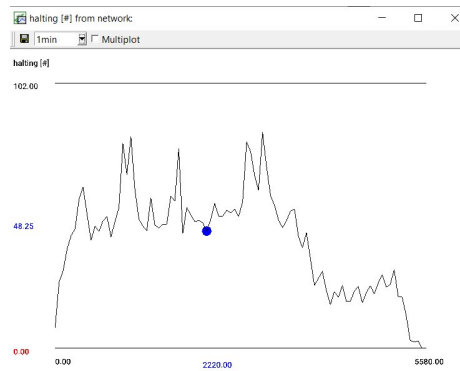


Рис. 17: ТЗ, які зупинились

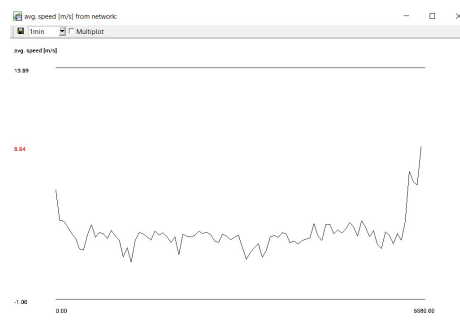


Рис. 18: Середня швидкість

```
Simulation ended at time: 5649.00.
Reason: All vehicles have left the simulation.
Performance:
  Duration: 6.39s
  Real time factor: 883.485
  UPS: 63853.956835
Vehicles:
  Inserted: 4541
  Running: 0
  Waiting: 0
Statistics (avg of 4541):
  RouteLength: 283.05
  Speed: 5.02
  Duration: 88.78
  WaitingTime: 46.04
  TimeLoss: 66.73
  DepartDelay: 526.29
DijkstraRouter answered 6940 queries and explored 14.93 edges on average.
DijkstraRouter spent 0.05s answering queries (0.01ms on average).
```

Рис. 19: Консольні дані

Таким чином, внаслідок занадто складної моделі перехрестя, як числові, так і графічні показники перехрестя значно погіршились, не приносячи при тому до стабілізації цих показників. Дана модель показала гірші резуль-

тати, ніж початкова, тому було прийнято рішення продовжити оптимізацію у сторону послаблення регулювання руху.

### 3.2 Покращена модель

Наступна модель будувалась із розрахунку послаблення регулювання та її спрощення. В першу чергу, було забрано чотири світлофори, що регулювали рух на чотирьох ключових перетинах доріг. Також, тимчасово було прибрано вулицю Покутську, для спроби оптимізації безпосередньо ключових вулиць. На даному етапі ключовим пунктом було розмежувати перехрестя, що не потребуватимуть та потребуватимуть регулювання світлофорами.

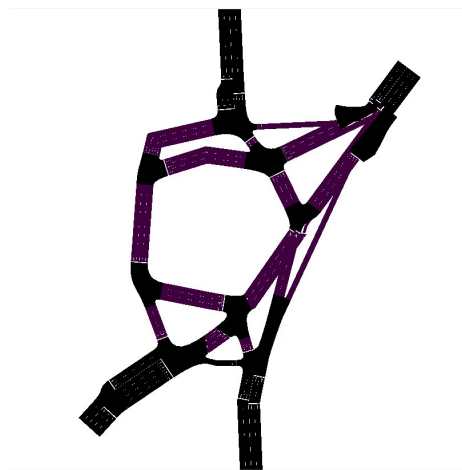


Рис. 20: Зображення нової моделі SUMO

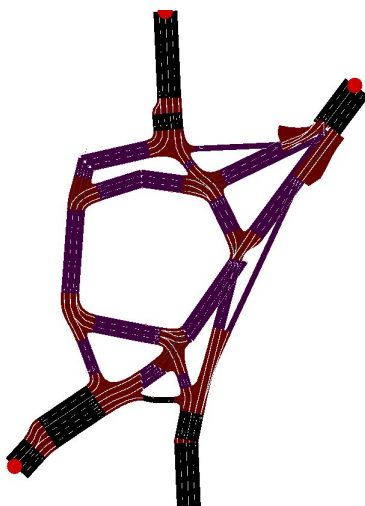


Рис. 21: Рух по смугах NetEdit

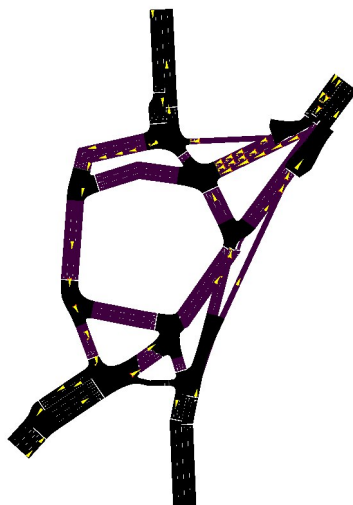


Рис. 22: Необхідність регулювання світлофором на перехресті J30



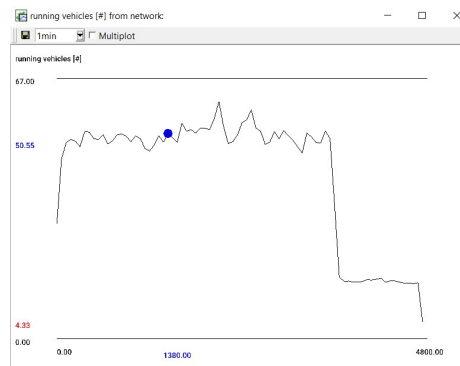


Рис. 23: ТЗ в русі

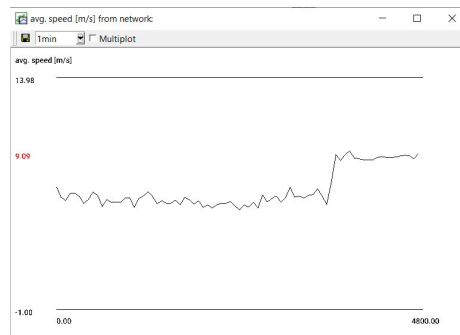


Рис. 24: Середня швидкість

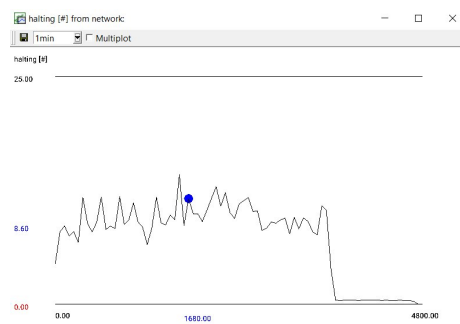


Рис. 25: Зупинені ТЗ

```
Simulation ended at time: 4760.00.  
Reason: All vehicles have left the simulation.  
Performance:  
Duration: 4.22s  
Real time factor: 1127.96  
UPS: 48508.056872  
Vehicles:  
Inserted: 4541  
Running: 0  
Waiting: 0  
Statistics (avg of 4541):  
RouteLength: 290.59  
Speed: 7.35  
Duration: 45.08  
WaitingTime: 6.65  
TimeLoss: 22.77  
DepartDelay: 255.50  
DijkstraRouter answered 6182 queries and explored 12.60 edges on average.  
DijkstraRouter spent 0.03s answering queries (0.00ms on average).
```

Рис. 26: Консольні дані моделі

Дана модель демонструє значне покращення, як і з попередньою версією, так і з початковим реальним варіантом організації перехрестя. Проте, при організації руху, можна помітити закономірний недостаток цієї моделі: на перехресті між в'їздом з вулиці Липинського та виїздом на вулицю Замарстинівську J30 створюються затори через невідповідну пріоритетність. Для цього було вирішено додати світлофор.

### 3.3 Найкраще оптимізована модель

Для останньої моделі було здійснено дві зміни, порівняно із попередньою: повернено вулицю Покутську та створено світлофор на перехресті J30 для відповідного регулювання руху та надання більшого часового проміжку для в'їзду з вулиці Липинського.

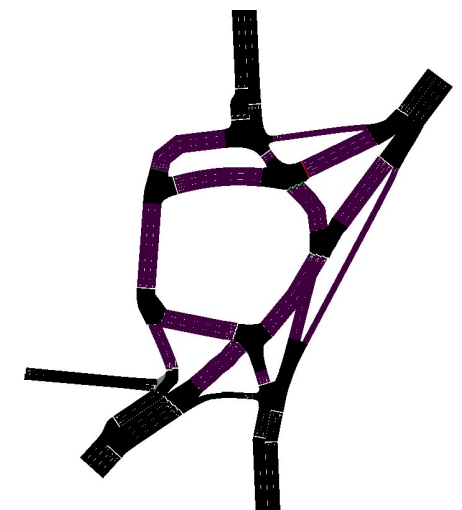


Рис. 27: Найбільш оптимальна модель в SUMO

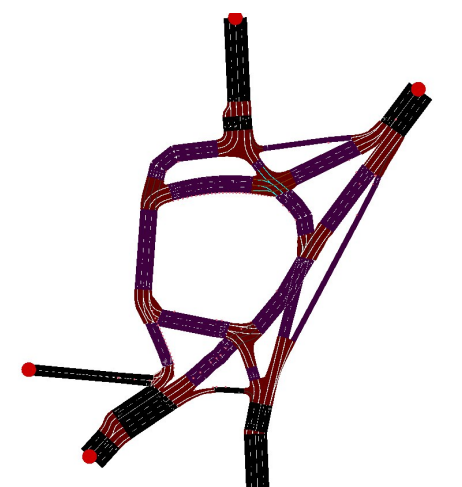


Рис. 28: Рух по смугах NetEdit

```

Step 1: 10000 vehicles for 4304.00 s /
Simulation ended at time: 4304.00.
Reason: All vehicles have left the simulation.
Performance:
Duration: 3.19s
Real time factor: 1350.49
UPS: 63898.336994
Vehicles:
Inserted: 4541
Running: 0
Waiting: 0
Statistics (avg of 4541):
Routelength: 289.77
Speed: 7.20
Duration: 44.84
WaitingTime: 9.89
TimeLoss: 22.70
DepartDelay: 128.25
DijkstraRouter answered 6117 queries and explored 12.38 edges on average.
DijkstraRouter spent 0.04s answering queries (0.01ms on average).

```

Рис. 29: Консольні дані моделі

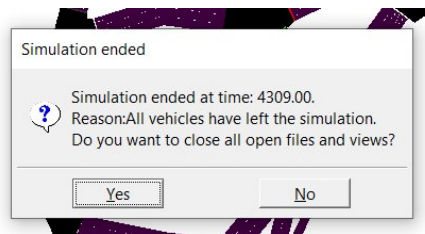


Рис. 30: Час симуляції

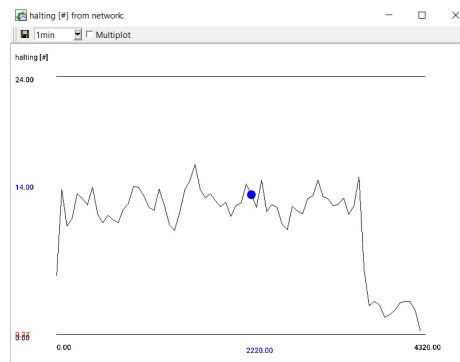


Рис. 31: Зупинені ТЗ

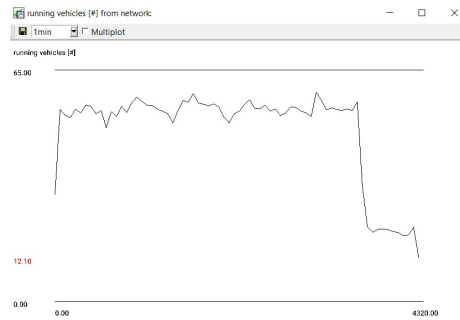


Рис. 32: ТЗ в русі

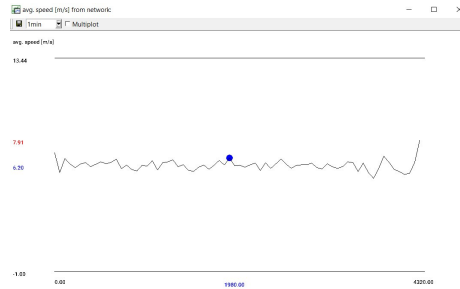


Рис. 33: Середня швидкість

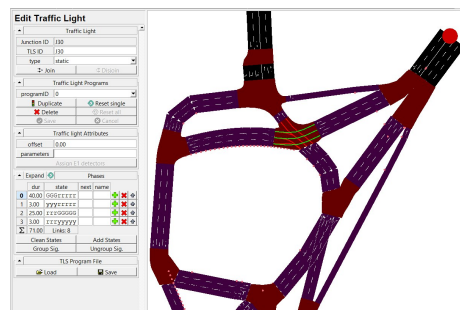


Рис. 34: Світлофор найкращої моделі

Внаслідок даних змін, незважаючи на мінімальне погіршення показників speed та waitingTime, бачимо покращення показників duration, timeLoss та departDelay. Також можемо помітити певну стабілізацію графіків averageSpeed, halting та runningVehicles, що свідчить про більш стабільну та прогнозовану

роботу перехрестя. В підсумку, даний варіант оптимізації перехрестя було обрано, як найкращий та такий, що відходить під вимоги постановки задачі.

## Висновки

Таким чином було досліджено способи організації руху на існуючому перехресті Липинського-Замарстинівська та варіанти його оптимізації. Було обрано два шляхи покращення результатів, які досить різнилися в значеннях параметрів оцінки. Третій спосіб виявився найоптимальнішим у питаннях балансу стабільності та числових показників і розвантажив транспортні потоки, перший - продемонстрував найгірші результати, що є гіршими, ніж початкові дані, а другий - майже ідентичний до найбільш оптимального варіанту, будучи навіть кращим у показниках speed та waitingTime. Отже, виконана робота висвітлює важливість математичного моделювання в цій галузі, аналізує різні методи симуляції та їхню ефективність, а також надає приклади реалізації та використання симуляції руху транспорту в практичних завданнях.

## Література

## Література

- [1] SUMO User Documentation [Електронний ресурс] / Eclipse Foundation, 2022. Режим доступу: [sumo.dlr.de/docs](http://sumo.dlr.de/docs).
- [2] Tutorial - SUMO User Conference 2022 [Електронний ресурс] / Eclipse Foundation, 2022. Режим доступу: YouTube.
- [3] Netedit (SUMO) Converting an intersection into a roundabout [Електронний ресурс] / Pure Weenakorn, 2019. Режим доступу: YouTube.

## Додаток

З реалізацією симуляції можна ознайомитися за посиланням на GitHub репозиторій: Traffic Simulation.